

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## **Separace vlhké páry v jaderných elektrárnách**

### **Moisture Separators in Nuclear Power Plants**

Student:

Matěj Dobner

Vedoucí bakalářské práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2014

## Zadání bakalářské práce

Student: **Matěj Dobner**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení  
Téma: **Separace vlhké páry v jaderných elektrárnách**  
**Moisture Separators in Nuclear Power Plants**

### Zásady pro vypracování:

Na základě studia literatury popište a analyzujte projekty separátorů parních generátorů a turbín na sytou páru v jaderných elektrárnách III. generace. Vysvětlete technickou koncepci těchto systémů a zdůrazněte jejich klady a zápory. Vytvořte přehled typů separátorů vlhké páry a rozdělte je podle vhodných kritérií. Ve výpočtové části proveďte návrh a hydraulický výpočet separátoru vlhké páry pro jadernou elektrárnu. Navrhněte základní rozměry.

Tepelný výkon jaderné elektrárny 3200 MWt; tlak syté páry 7 MPa; teplota chladiva v I. okruhu 298,2/328,9 °C; tlak v I. okruhu 16,2 MPa; parní výkon 1 602 t/hod, teplota napájecí vody 225 °C.

### Seznam doporučené odborné literatury:

Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X.

Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.

František Hezoučský: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

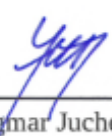
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 17.5.2014

.....  
.....

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněn v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 17.5.2014

  
.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Matěj Dobner

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bystřice pod Hostýnem

Topolová 1508

76861

## **Anotace bakalářské práce**

Dobner, M. *Separace vlhké páry v jaderných elektrárnách: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 48 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá popsáním a analýzou jednotlivých druhů separátorů pro parní generátory. Úvodní teoretická část popisuje základní princip a funkci jednotlivých separátorů. Dále popisuje problematiku vlhké páry a její dopad na zařízení v jaderné elektrárně. V praktické části navrhuji dvoustupňovou separaci, která bude tvořena cyklónovým a žaluziovým separátorem. V závěru práce popisuji několik konstrukčních variant možných řešení separátorů.

Dobner, M. *Moisture Separators in Nuclear Power Plants: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2014, 55 s. thesis supervisor: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The bachelor thesis deals with the description and analysis of various types of separators for steam generators. The theoretical part describes the basic principle and the function of the separator. It also describes the problems of wet steam and its impact on nuclear facilities in power plants. In the practical part, I propose a two-stage separation, which will consist of a cyclone louver separators. In conclusion I describe several desing options for possible solutions of separators.

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název
$c$	$\text{m.s}^{-1}$	výtoková rychlost z lopatkové mříže
$c$	$\text{m}$	přídavek k tloušťce stěny
$c_p$	$\text{J.kg. K}^{-1}$	měrné teplo za konst. tlaku
$d$	$\text{m}$	průměr
$D_c$	$\text{mm}$	vnitřní průměr hrubého separátoru
$D_d$	$\text{m}$	vnitřní průměr dna
$D_n$	$\text{mm}$	vnitřní průměr separátoru
$D_o$	$\text{mm}$	průměr lopatkování
$D_p$	$\text{mm}$	vnitřní průměr tlakové nádoby parního generátoru
$D_s$	$\text{m}$	vnitřní průměr horní části parogenerátoru
$e_1$	$\text{m}$	šířka 1. stupně žaluzií
$e_2$	$\text{m}$	šířka 2. stupně žaluzií
$G$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	parní výkon
$h$	$\text{mm}$	průmět čelní hrany lopatky
$h_c$	$\text{mm}$	činná výška separátoru
$H_{sp}$	$\text{mm}$	výška separačního prostoru
$h_z$	$\text{mm}$	činná výška žaluzií
$H_z$	$\text{mm}$	výška žaluziové vestavby
$J$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$	zatížení parního prostoru
$K$	1	koeficient tvaru dna
$k$	1	součinitel kontrakce
$k$	$\text{W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel prostupu tepla
$Ku$	1	Kutateladzeho kritérium
$l$	$\text{m}$	minimální délkový rozměr separátoru
$L$	$\text{m}$	délka
$M_p$	$\text{kg. s}^{-1}$	parní výkon hrubého separátoru
$n$	1	počet lopatek
$n$	1	koeficient
$n_c$	1	počet hrubých separátorů
$N_c$	$\text{t. h}^{-1}$	parní zatížení hrubého separátoru
$N_h$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$	parní zatížení hladiny
$p$	$\text{MPa}$	výpočtový tlak
$p_1$	$\text{MPa}$	tlak v sekundárním okruhu
$p_p$	$\text{MPa}$	tlak páry
$p_s$	$\text{Pa}$	tlak za lopatkami hrubého separátoru
$p_z$	$\text{Pa}$	tlak páry za žaluziemi
$Q$	$\text{W}$	tepelný výkon
$r_e$	$\text{m}$	poloměr kontrakce proudu
$R$	$\text{m}$	poloměr zakřivení lopatky

$S$	$m^2$	plocha
$s$	$m$	tloušťka stěny
$s_d$	$m$	tloušťka dna separátoru
$S_p$	$m^2$	velikost hladiny v PG
$s_s$	$m$	tloušťka stěny separátoru
$S_{z1}$	$m^2$	průtočná plocha 1. stupně žaluzií
$S_{z2}$	$m^2$	průtočná plocha 2. stupně žaluzií
$S_{žal}$	$m^2$	průtočná plocha žaluzií
$t$	$mm$	rozteč lopatek
$t_p$	$^{\circ}C$	teplota páry
$t$	$^{\circ}C$	teplota syté páry na mezi sytosti
$t_1$	$^{\circ}C$	teplota vody na vstupu do úseku
$t_2$	$^{\circ}C$	teplota vody na výstupu do úseku
$u_1$	$m.s^{-1}$	vstupní obvodová rychlost
$u_2$	$m.s^{-1}$	vstupní obvodová rychlost před lopatkovou mříží
$u_n$	$m.s^{-1}$	obvodová rychlost na průměru $D_n$
$u_o$	$m.s^{-1}$	obvodová rychlost na průměru $D_o$
$v'$	$m^3.kg^{-1}$	měrný objem syté kapaliny
$v''$	$m^3.kg^{-1}$	měrný objem syté páry
$V''$	$m^3.s^{-1}$	průtočný objem páry
$w_{kr}$	$m.s^{-1}$	kritická rychlost
$w_{op}$	$m.s^{-1}$	rychlost v odváděcím potrubí
$w_2$	$m.s^{-1}$	vstupní relativní rychlost před lopatkovou mříží
$w_{vs}$	$m.s^{-1}$	skutečná rychlost na žaluziích
$x_c$	$\%$	suchost páry za žaluziemi
$\alpha$	$^{\circ}$	výtokový úhel
$\beta$	$^{\circ}$	nátokový úhel
$\gamma$	$^{\circ}$	úhel
$\mu$	$1$	součinitel pro určení kontrakce
$\xi_z$	$1$	koeficient odporu žaluzie
$\rho$	$kg.m^{-3}$	měrná hmotnost média
$\rho'$	$kg.m^{-3}$	měrná hmotnost syté kapaliny
$\rho''$	$kg.m^{-3}$	měrná hmotnost syté páry
$\sigma$	$N.m^{-1}$	povrchové napětí kapaliny
$\phi$	$1$	součinitel pevnosti
$\Delta p$	$Pa$	tlaková ztráta hrubého separátoru
$\Delta p_c$	$Pa$	celková tlaková ztráta
$\Delta p_{kr}$	$Pa$	tlaková ztráta kuželovitým rozšířením kanálu
$\Delta p_z$	$Pa$	tlaková ztráta žaluziového separátoru
$\Delta p_{zp}$	$Pa$	tlaková ztráta změnou směru proudu
$\Delta t$	$^{\circ}C$	rozdíl teplot v úseku
$\Delta t_{t1}$	$^{\circ}C$	rozdíl teplot
$\Delta t_{t2}$	$^{\circ}C$	rozdíl teplot

# Obsah

Seznam použitých symbolů .....	6
1.Úvod .....	10
2. Popis jaderné elektrárny .....	11
2.1 Základní princip jaderná elektrárny .....	11
2.2 Princip štěpné reakce .....	11
2.3 Okruhy jaderných elektráren .....	12
2.3.1 Primární okruh .....	12
2.3.2 Sekundární okruh .....	15
2.3.3 Chladicí okruh .....	17
3. Separace vlhké páry .....	18
3.1 Expanze syté páry v turbíně .....	18
3.2 Eroze lopatek .....	19
3.3 Způsoby separace páry .....	20
3.3.1 Pasivní způsob .....	20
3.3.2 Aktivní způsob .....	20
4. Vnější separace vlhké páry .....	21
4.1 Sítové separátory .....	21
4.2 Cyklónové separátory .....	22
4.3 Žaluziové separátory .....	22
4.4 Porovnání vnějších separátorů .....	23
4.5 Přihřívač páry .....	23
4.6 Separátor - přihřívač páry SPP .....	24
4.6.1 Konstrukční provedení kombinovaných SPP .....	25
5. Návrh separace pro parní generátor .....	26
5.1 Základní rozměry a parametry svislého parního generátoru .....	26
5.2 Návrh separace .....	27



5.2.1 Počet separačních stupňů .....	28
5.3 Hrubý separátor - cyklónový.....	29
5.4 Návrhy dalších variant hrubé separace .....	35
5.5 Jemný separátor - žaluziový.....	37
5.5.1 Návrh jemného odlučovače I. varianta.....	38
5.5.2 Návrh jemného odlučovače II. varianta .....	40
5.6 Návrhy dalších variant jemné separace.....	42
6.Závěr .....	44
Seznam použité literatury .....	45
Přílohy.....	47

# 1.Úvod

Spotřeba elektrické energie ve světě neustále roste, rostou také nároky na její výrobu. Světová rada pro energii (WEC) vydala studii, kde spotřeba elektrické energie bude v příštích 25 letech dvojnásobná. Pro ekologii země by to mělo katastrofální dopad. Došlo by ke zvýšení emisí  $\text{CO}_2$  až o 100%. Výroba energie závisí na zásobách primárních energetických zdrojů (PEZ) jako je ropa, zemní plyn, uhlí a také uran. Zásoby uhlí a uranu jsou poměrně rovnoměrně rozprostřeny po celém světě. Na rozdíl od ropy kde přibližně 30% světových zásob je v Saudské Arábii. Velká naleziště zemního plynu také kontroluje Rusko, Spojené státy Americké, Katar, Írán. Státy, které nemají naleziště primárních energetických zdrojů jsou závislé na dodávkách ze zahraničí. V posledních letech dochází ke zvyšování produkce  $\text{CO}_2$  při spalování fosilních paliv. Nejlepší řešení proti zvyšování produkce  $\text{CO}_2$  jsou jaderné elektrárny, které neprodukují žádné skleníkové plyny a tím dochází ke snižování emisí v ovzduší. Dalším argumentem pro jadernou energii je, že patří ve světě mezi nejlevnější energetické zdroje. Cena 1 kWh vyrobené v jaderné elektrárně Temelín je 0.992 Kč.

Jaderná energetika je přirozenou součástí téměř všech vyspělých zemích světa. V České republice jsou postaveny dvě jaderné elektrárny a v budoucnosti se plánuje s výstavbou třetí jaderné elektrárny. Jaderná energetika bude mít zásadní vliv na rozvoj ekonomiky i v budoucnu. Výrobu elektrické energie je třeba zajistit co nejefektivněji a tím je třeba věnovat pozornost prvkům, aby neovlivňovali hospodárnost výroby. Jeden z prvků je separátor – přihřívač páry pro parní turbínu. Separátor – přihřívač je postaven jako jedno zařízení. Separátory jsou umístěny v sekundárním oběhu jaderné elektrárny. Separátory slouží k odstranění vlhkosti páry, která vzniká v turbíně. Jak dosahuje vlhkost syté páry hodnoty 14 %, používáme separátor, který odstraní vlhkost až na hodnotu 1 %. Potom pára pokračuje do přihřívače, kde se přihřeje a pokračuje na nízkotlakou turbínu. Úkol separátoru je dosáhnout maximální separace kapiček vody, aby nedošlo ke snižování účinnosti turbíny. Další věcí, které chceme zabránit, je eroze lopatek turbíny. Cílem této práce je popis základního principu separátorů (horizontálních a vertikálních) v jaderných elektrárnách III+ generace středního výkonu. Další částí této práce je hydraulický výpočet separátoru vlhké páry pro jadernou elektrárnu.

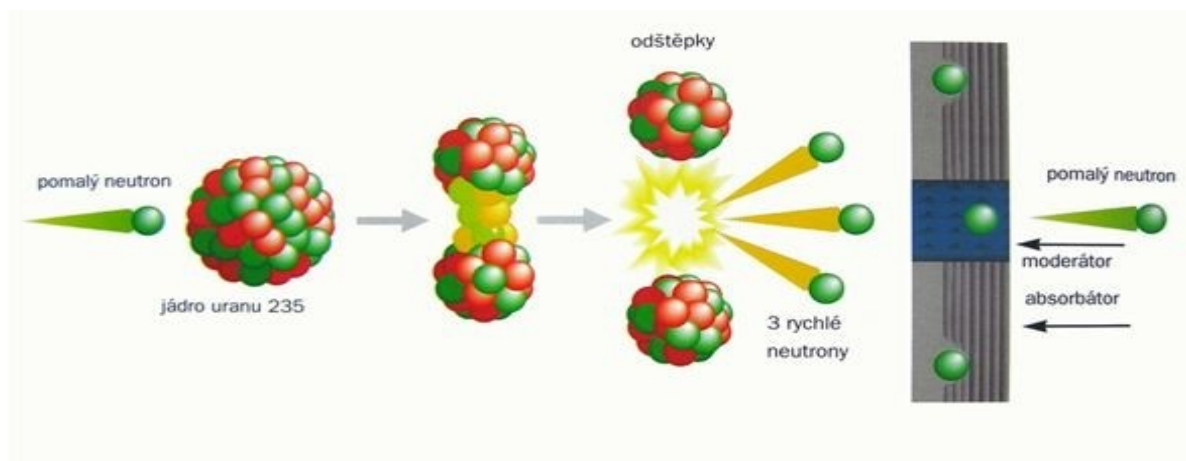
## 2. Popis jaderné elektrárny

### 2.1 Základní princip jaderné elektrárny

Jaderné elektrárny fungují na stejném principu jako elektrárny uhelné. Rozdíl je v palivu pro elektrárnu. V jaderné elektrárně je za pomoci štěpné reakce v reaktoru uvolňováno teplo a to je dále předáváno napájecí vodě. Napájecí voda se přeměňuje na páru a pokračuje na jednotlivé části turbíny, které pohání generátor. Generátor přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Palivo jaderné elektrárna je obohacený nebo přírodní uran. V současných jaderných elektrárnách se používá obohacený uran. Ten vznikne přidáním izotopu  $^{235}\text{U}$  k přírodnímu uranu. V jaderných elektrárnách v ČR se používá jako palivo obohacený uran  $^{235}\text{U}$  a obohacuje se přibližně na 4%.

### 2.2 Princip štěpné reakce

Základním principem je řízená řetězová štěpná reakce, při které dochází k vývinu tepla. Štěpná reakce probíhá v jaderném reaktoru, který může být tlakovodný nebo varný. Při řetězové štěpné reakci dochází k interakci tepelných neutronů s jádry těžkých prvků (Uran-235, Plutonium-239). Tímto dochází k rozštěpení jader na štěpné produkty a tím vznikají další 2-3 rychle neutrony, které dále štěpí další jádra těžkých kovů. Při výrobě energie potřebujeme zpomalovat neutrony a to pomocí atomů. Ke zpomalování neutronů používáme tzv. moderátory. Jako moderátory se používají jádra lehkých prvků např. uhlíku, vodíku, deuteria a berilia. U jaderných elektráren v ČR se používá jako moderátor tzv. lehká voda. Koncentrace kyseliny borité v chladivu reguluje počet neutronů v aktivní zóně. [6]

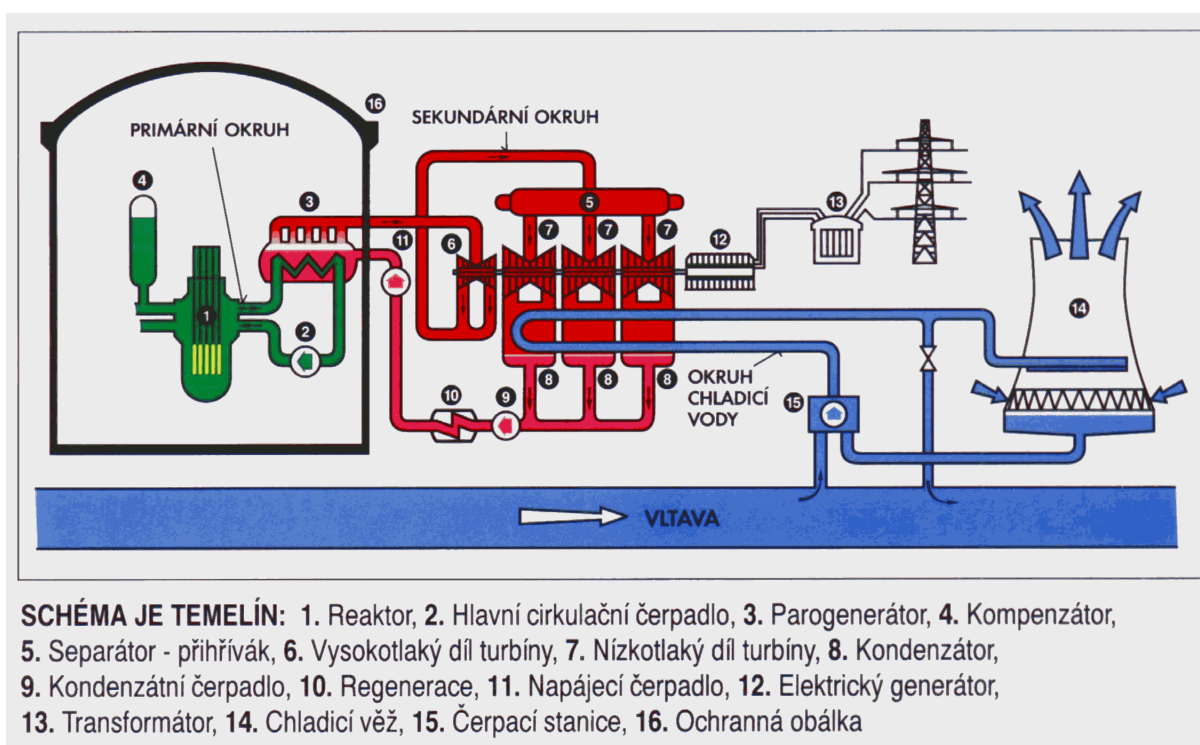


Obr. 1 Schéma štěpné reakce z lit. [6]

## 2.3 Okruhy jaderných elektráren

Většina jaderných elektráren ve světě je složena ze tří základních okruhů, které, na sebe navazují.

- Primární okruh
- Sekundární okruh
- Chladicí okruh



Obr. 2 Schéma JE Temelín lit. [13]

### 2.3.1 Primární okruh

Každý blok jaderné elektrárny je tvořen primárním a sekundárním oběhem. V aktivní zóně reaktoru dochází k přeměně jaderné energie. V primárním okruhu dochází k odvodu tepla z aktivní zóny pomocí chladiva proudícího v primárním potrubí parogenerátoru. V parogenerátoru jsou umístěné teplosměnné plochy, které předávají teplo vodě sekundárního okruhu. Teplosměnné plochy oddělují primární okruh s radionuklidy a neradioaktivní sekundární oběh. Voda z parogenerátoru se vrací pomocí hlavních cirkulačních čerpadel zpět do reaktoru. Celý primární okruh můžeme definovat jako tlakovou nádobu zaplněnou

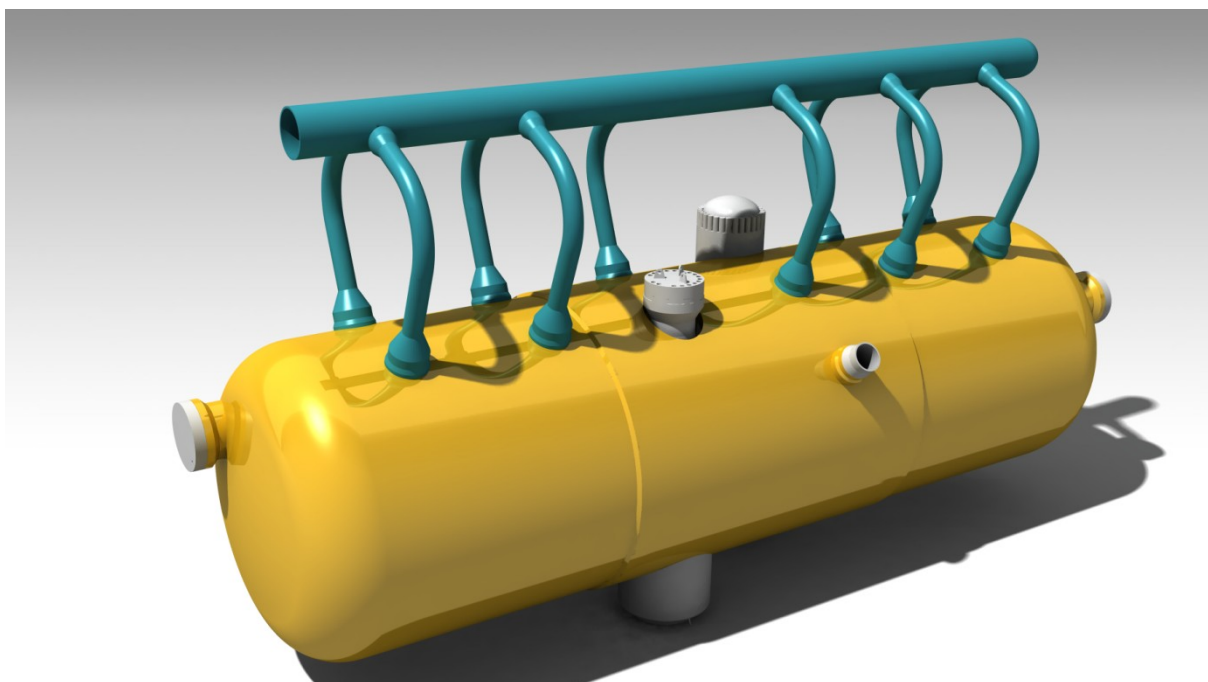
chladiivem. Chladio je závislé na teplotních změnách okruhu a tím dochází ke změnám tlaku v primárním okruhu. Regulování tlaku probíhá za pomoci systémů kompenzace. Systém kompenzace se skládá z kompenzátoru objemu, barotážní nádrže a pojišťovacích ventilů. Jestliže dojde ke snížení tlaku, vzniká nebezpečí vzniku páry v aktivní zóně reaktoru a naopak, při zvýšení tlaku může dojít k porušení celistvosti primárního okruhu. [6]

## **Reaktor**

V jaderné elektrárně Temelín a Dukovany se používá tlakovodní reaktor. Tento typ je nejpoužívanějším reaktorem ve světě. Jedná se o tlakovodní reaktory - Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor (PWE). Palivem ve formě tabletek je obohacený uran. Palivo je uloženo v palivových tyčích o průměru 9 mm. Na povrchu tyčí je povlak na bázi zirkonia. Zirkonium zajišťuje předání tepla z paliva chladiivu. Dalším úkolem je zajištění ochrany před radioaktivním štěpením produktů. Do reaktoru se vkládají kazety, které jsou tvořeny svazky palivových tyčí. Výměna paliva probíhá přibližně jednou za 1,5 roku a nahrazuje se 1/3 paliva. Voda, která proudí reaktorem, slouží jako chladio a moderátor je pod vysokým tlakem a teplotě okolo 300°C. Regulace výkonu probíhá za pomoci absorbátoru, který je ve formě tyčí. Výškou zasunutí nebo vysunutí absorbátoru se reguluje výkon. Ochranným prvkem reaktoru jsou havarijní tyče, které mají vyšší obsah absorberu. Jejich zasunutí způsobí zastavení reaktoru. [3]

## **Parogenerátor**

Jedná se o tlakovou nádobu s teplosměnnými plochami. Parogenerátor předává tepelnou energii chladiivu reaktoru napájecí vodě. V parogenerátoru se spojuje primární a sekundární okruh. Pro zaručení požadované suchosti páry se nachází v parogenerátoru separátor páry, který zaručuje správnou suchost páry vstupující na turbínu. [1]



Obr. 3 Model parogenerátoru lit [10]

## Cirkulační čerpadla

Cirkulační čerpadla slouží k dopravě chladicí kapaliny v primárním okruhu v přesně daném množství, které odpovídá výkonu reaktoru. Chladicí kapalina proudí ve dvou větvích, a to v teplé a studené. Ve spodní části kontejmentu je umístěna studená větev a cirkulační čerpadlo vrací chladivo z parogenerátoru zpět do reaktoru. Cirkulační čerpadlo je poháněno asynchronním motorem. Jedná se o ucpávkové cirkulační čerpadlo. [1]

## Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je tlaková nádoba, která slouží k udržování konstantního tlaku primárního objemu. Skládá se z vody a vodní páry. Díky vnitřním sprchám a elektroohřívákům snižuje nebo zvyšuje tlak. Jestliže nastane potřeba snížit tlak, zapne se vodní sprcha v horní části kompenzátoru. Tím dojde ke snížení teploty kondenzující páry, a hladina vody stoupne, tím pádem tlak poklesne. Při zvyšování tlaku se v kompenzátoru zapnou elektrické ohříváky pod vodní hladinou. Tím se produkuje více páry, a dojde ke zvýšení tlaku. [1]

## Kontejment

Jedná se o bezpečnostní prvek z betonu a oceli. Uzavírá celý primární okruh, aby v případě havárie nedošlo k úniku radioaktivních látek do ovzduší. Další funkcí je mechanická ochrana proti přírodním katastrofám. Kontejment je postaven pro udržení vysoké těsnosti i při vysokém tlaku uvnitř. Při běžném provozu je uvnitř mírný podtlak, tím je zajištěno v případě netěsnosti nasávání vzduchu dovnitř. [2]

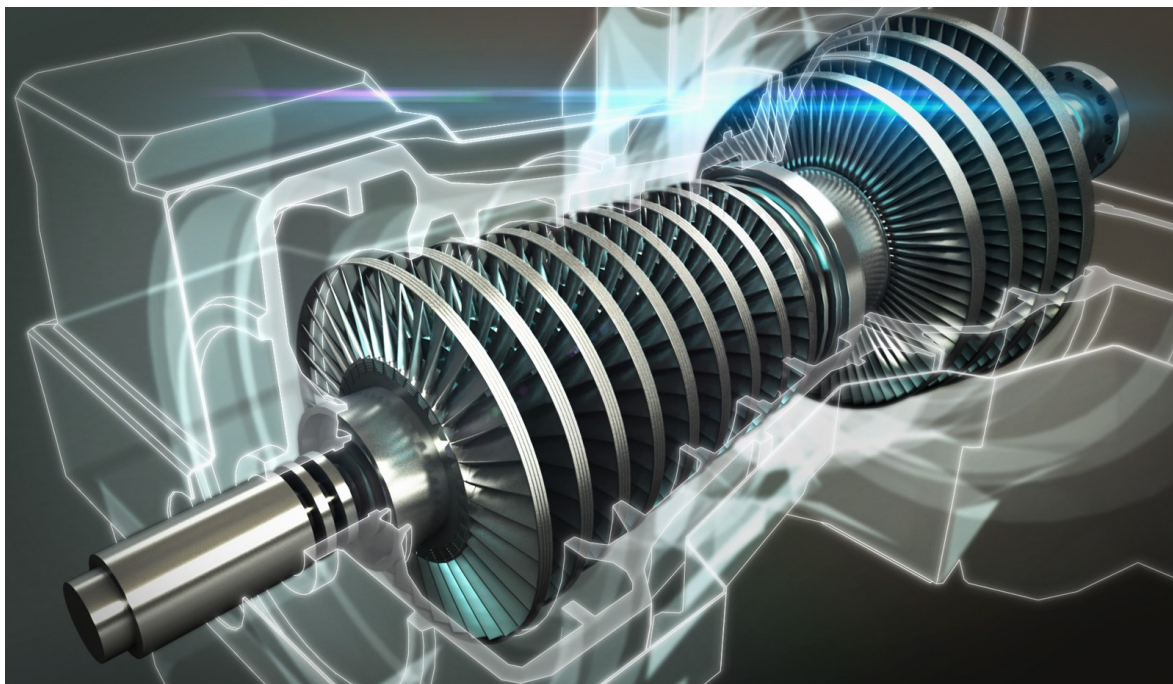
### 2.3.2 Sekundární okruh

V sekundárním okruhu dochází k přeměně tepelné energie z primárního okruhu na elektrickou energii. V sekundárním okruhu nedochází k přímému kontaktu radioaktivní pracovní látky z reaktoru, tudíž není radioaktivní. Proto není potřeba taková bezpečnostní opatření jako v primárním okruhu. Pára není radioaktivní a je pracovní látkou. Zdrojem páry v sekundárním okruhu jsou parogenerátory, a pára z nich expanduje na vysokotlakou část turbíny (VT).

Zde dojde k předání asi 40% své energie. Tím dojde k poklesu teploty, tlaku a dojde ke zvýšení vlhkosti páry. Abychom odstranili vlhkost je pára odváděná do separátorů-přihříváčů páry (SPP). V separátoru dojde k odloučení vlhkosti a k dalšímu ohřevu nad mez sytosti pomocí páry, která byla odebrána před vstupem do vysokotlakého dílu turbíny. Potom pára pokračuje na nízkotlakou část turbíny (NT) a do kondenzátoru. V kondenzátoru dochází k výměně tepla do chladicí vody a snížením tlaku na 4 kPa. Pomocí nízkotlaké a vysokotlaké regenerace je kondenzát ohříván a dopravován pomocí čerpadel do parogenerátoru. Turbína předává mechanickou energii do generátoru, kde dochází ke změně na elektrickou energii. [2]

## Turbíny

Jsou lopatková rotační zařízení, které umožňují transformovat tepelnou a kinetickou energii páry na energii mechanickou rotoru turbíny. Turbína má dvě hlavní části a to stator a rotor. Stator je nepohyblivá část turbíny a rotor je pohyblivá část. Turbína je rozdělena do několika částí podle výkonu elektrárny. Nejčastější rozdělení na tři díly, vysokotlaká, středotlaká a nízkotlaká část. [1]



Obr.4 Model turbíny pro sytou páru lit [11].

## **Kondenzátor**

Kondenzátor je umístěný za posledním dílem turbíny a jedná se o trubkový výměník. Dochází k ochlazení páry vycházející z turbíny páry pomocí chladicí vody. Svazek trubek v kondenzátoru tvoří teplosměnnou plochu. [1]

## **Regenerační ohřívák**

Jedná se o tepelný výměník tvořený svazkem trubek. Používají se dva druhy, nízkotlaký a vysokotlaký regenerační ohřívák. Typ ohříváku určuje, ze které části turbíny byla pára odebrána. Před napájecí nádrž je umístěn nízkotlaký regenerační ohřívák a provádí odběr z nízkotlaké části turbíny. Vysokotlaký ohřívák je umístěn před vstupem do parogenerátoru a odebírá páru z vysokotlaké části. Použitím regeneračních ohříváku zlepšujeme účinnost celého oběhu. [1]



### 2.3.3 Chladicí oběh

Zajišťuje co nejmenší možný podtlak v kondenzačním výměníku. Snížením teploty vody v chladicím okruhu, zvýšíme podtlak v kondenzátoru, a tím se zvýší účinnost při expanzi v turbíně. [2]

#### Hlavní součásti okruhu

##### Chladicí věž

Slouží k odvádění tepla z kondenzátoru za pomoci chladiva. Rozlišujeme dva základní typy s přirozeným a nuceným tahem. Ty dále rozdělujeme na protiproudé a příčněproudé. V průběhu chlazení dochází k úbytku vody, která se musí průběžně doplňovat. [2]



Obr. 5 Chladicí věže lit [12]

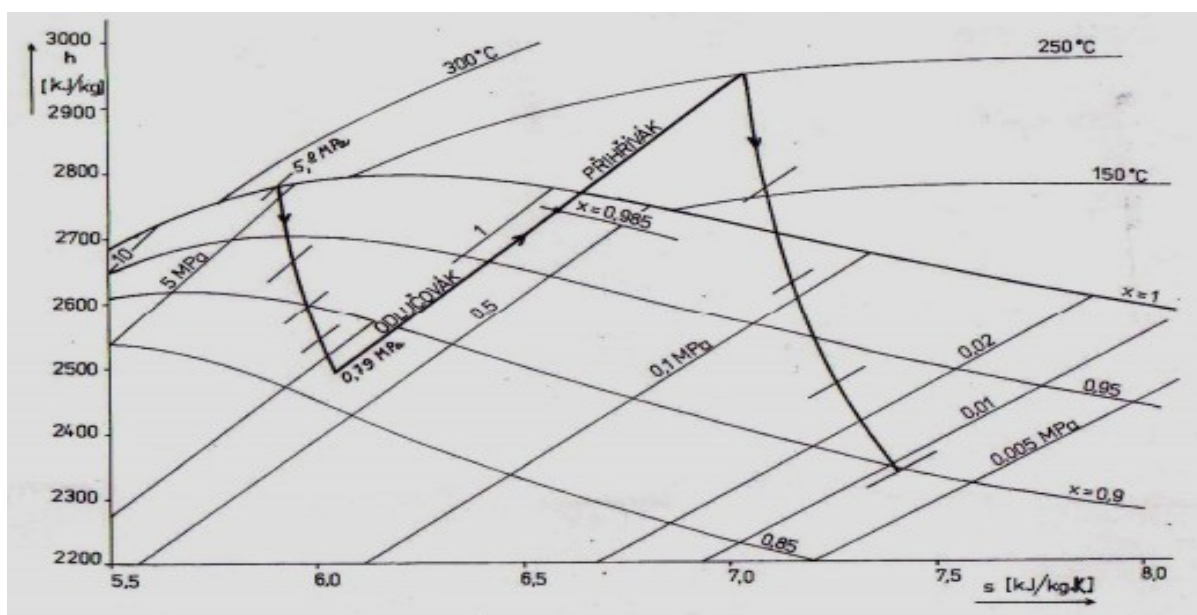
##### Oběhová čerpadla

Oběhová čerpadla zajišťují cirkulaci vody mezi chladicí věží a kondenzátorem. Kvůli větší bezpečnosti je potřeba mít záložní čerpadla a také záložní zdroje energie. [1]

### 3. Separace vlhké páry

#### 3.1 Expanze syté páry v turbíně

V jaderných elektrárnách je nejrozšířenějším typem turbína na sytou páru. Při expanzi páry v turbíně dochází ke snížení vlhkosti páry a snižuje se tedy sytost páry. Jestliže se vlhkost páry zvětšuje, dochází k poklesu termodynamické účinnosti a zvětšuje se nebezpečí erozivního a korozivního působení na lopatky turbíny. Vlhkost páry při expanzi se musí pohybovat pod hranicí 14%. Jestliže dojde ke snížení suchosti páry při expanzi v první vysokotlaké části turbíny na hodnotu zhruba 0,87 musí se zbavit vlhkosti, než vstoupí do druhé (nízkotlaké) části turbíny. [7]



### 3.2 Eroze lopatek

Eroze lopatek turbíny je způsobena vlhkostí páry, ta snižuje termodynamickou účinnost turbínového stupně. Erozi způsobují velké kapky vody dopadající na lopatky turbíny. Velké kapky mají menší rychlost než pára a dochází ke srážení na rozváděcích lopatkách. Malé kapky a mlhovina lopatkám neškodí, protože mají větší rychlost a pohybují se s expandující párou tzn., čím je větší rychlost kapek, tím je menší jejich škodlivý účinek. Je dokázáno, že kapky o průměru  $d < 1-5 \mu\text{m}$  se pohybují se základním proudem páry a procházejí lopatkovou mříží, bez kontaktu s profilem. Kapky o rozměrech  $d > 50-100 \mu\text{m}$  mají jinou trajektorii než proud páry a dochází k odtržení a přichází do kontaktu s profilem. Snižování termodynamické účinnosti dochází vlivem velkých kapek, které mají jinou dráhu letu a narážejí do lopatek, a tím tyto lopatky brzdí. K největšímu opotřebení lopatek dochází ve třetině délky. V tomto místě vlivem setrvačnosti, dochází k největší koncentraci velkých kapek. Při nárazu na lopatky, dochází k vytvoření vodního filmu, který je unášen k obvodu a k výstupním hranám lopatek. S erozí lopatek je také spojena koroze a to především nelegovaných ocelí. Proto se doporučuje používat oceli Cr 13 %. Někdy se dá použít navaření chromové oceli na uhlíkovou ocel. [4]



Obr.7 Poškozené lopatky turbíny vlivem erozivního působení vlhké páry lit [14]

### **3.3 Způsoby separace páry**

#### **3.3.1 Pasivní způsob**

Úkolem pasivních způsobu separace je zvýšení odolnosti povrchu turbíny a to především lopatek proti erozi. Jednou z nejdražších částí turbíny jsou lopatky, proto se je snažíme vyrobít co nejodolnější. Nejčastější způsob ochrany vstupní hrany je pomocí elektrojiskrového nanesení ochranné vrstvy slitiny karbidu niklu a chrómu. Další možností ochrany je připájení satelitových destiček pomocí elektrického ohřevu. Tloušťka destiček je v rozmezí 1,5 – 2, mm.

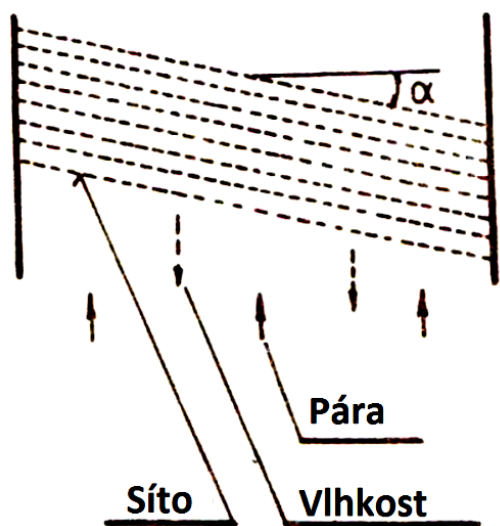
Tento způsob ochrany se nesmí používat u turbín pracujících s radioaktivní párou. Poslední způsob pasivní ochrany je povrchové kalení lopatek. Kalení lopatek provádíme na vstupních hranách lopatek v horní třetině jejich délky. Nevýhoda je, že snižujeme mez únavy základního materiálu. Mezi nejlepší druhy pasivní ochrany je připájení satelitových destiček, nižší kalený povrch a nejnižší elektrojiskrově nanesená vrstva. Naopak, elektrojiskrové nanášení materiálů je, co se týče zmenšení meze únavy materiálu, nejlepší. Tento způsob je technologicky nejméně náročný. V provozu se dává přednost spíše aktivním způsobům. [7]

#### **3.3.2 Aktivní způsob**

Úkolem aktivního způsobu separace je snížení obsahu vody v parním cyklu. Jeden ze způsobů odstranění vlhkosti z páry je pomocí odvádění vody za oběžnými a rozváděcími lopatkami turbín. Odstředivou silou je voda odtlačována k obvodu, kde se odebírá. Je nutno odsávat vlhkost u rozváděcích lopatek, na jejich vyduté části u výstupních hran štěrbin napojených na dutinu lopatky. Štěrbiny na odvod vlhkosti nemají vliv na energetické ztráty. Duté rozváděcí lopatky u koncových stupňů vytápíme. Vytápění provádíme parou z regeneračního odběru. K odvodu vlhkosti slouží také regenerační odběry. Částečně můžeme odloučit vlhkost pomocí lopatkové mříže (tzv. vnitřního separátoru). Díky lopatkové mříži se proudící pára uvede do rotace a vlhkost se odstředí ještě před vstupem do turbíny. V jaderné energetice nejčastěji používáme vnější separátory, ty nejsou součástí turbíny na rozdíl od vnitřních separátorů. Pára po expanzi ve vysokotlaké části turbíny pokračuje do separátoru, kde dojde k odloučení vlhkosti a pára se ještě přihřeje a pokračuje do nízkotlaké části turbíny. [7]

## 4. Vnější separace vlhké páry

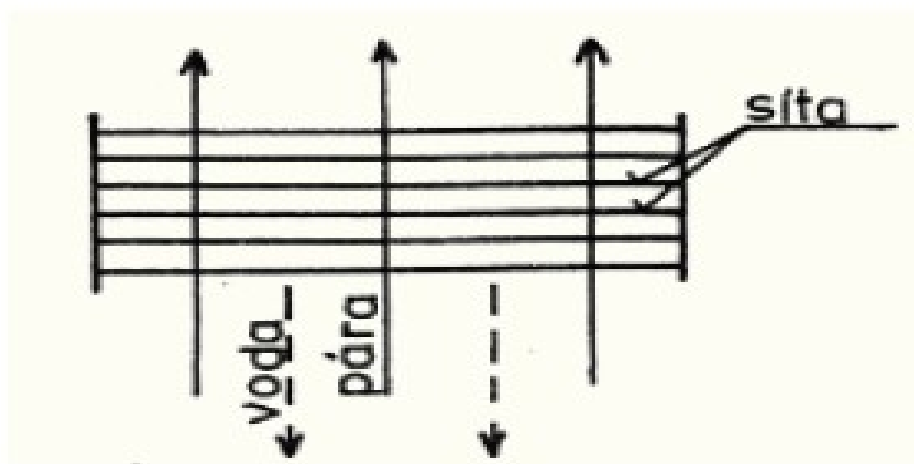
### 4.1 Síťové separátory



Obr. 8 Schéma síťového separátoru lit [14]

Síťové separátory jsou odlučovače páry tvořené válcovými profily, které jsou uspořádané do šachovnice. Účinnost odloučení závisí na průměru válcového profilu. Průměr drátu je v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. Dráty mohou být buď vodorovné, nebo pod úhlem maximálně 15°. V separátoru je těchto sítí za sebou řazených více. Pára proudí přes síť, kde dochází k zachycení kapek vody a následně důsledkem tíhovou silou

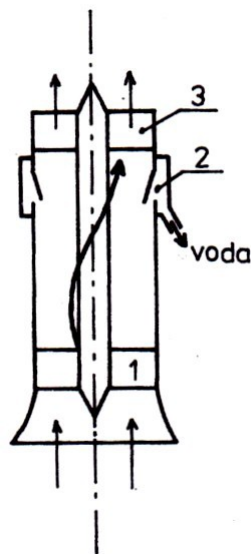
odkapávají dolů. Rychlost proudící páry musí být poměrně malá až 2 m.s, aby padající kapky nebyly znovu unášeny proudem. Malé rychlosti proudící páry, dosáhneme velkých rozměrů separátorů. Tlaková ztráta separátorů je velice mála a výstupní pára má vlhkost 0,1 až 0,2 %. Síťové separátory jsou buď vertikální, nebo horizontální. [1]



Obr 9 Princip síťového separátoru lit [1]

## 4.2 Cyklónové separátory

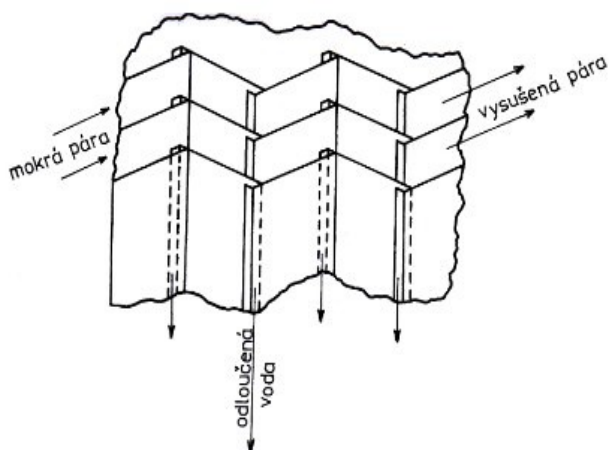
Pára vstupující do separátoru je pomocí nepohyblivých lopatek uvedena do rotace. Vlivem odstředivé síly jsou těžké kapky unášeny po obvodu cyklónu a odváděny šterbinami. Kapky vody, které nejsou tak těžké, jsou odloučeny až ve výstupních difúzních lopatkách, kde je část kinetické energie přeměněna na tlakovou. Nevýhoda cyklonových separátorů je velká tlaková ztráta a vlhkost páry na výstupu je kolem 1 %. [1]



Obr. 10 Princip cyklonového separátoru [1]

## 4.3 Žaluziové separátory

Žaluziové separátory jsou tvořeny vertikálně orientovanými vlnitými plechy tzv. žaluziemi.



Obr. 11 Princip žaluziového separátoru [1]

Maximální sklon žaluzií může být 30°. Vlhká pára protéká žaluziemi s lehkými výchylkami směru. Jakmile dojde k vychýlení směru dochází k odloučení vody. Kapky vody vytvářejí na žaluziích vodní film, který po nich stéká svisle dolů. Žaluziové odlučovací nejsou tak citlivé na změnu rychlosti proudící páry, ale tato rychlost by neměla překročit kritickou rychlost, při které by došlo k trhání vodního filmu, a kapky vody by se opět dostávaly do proudu páry a znovu by byly

unášeny. Vlhkost páry, která prošla tímto odlučovákem je 0,4 %. [1]

## 4.4 Porovnání vnějších separátorů

Popis základních typů síťových, cyklonových a žaluziových separátoru je popsáno v kapitole 4.1 až 4.3.

Druh separátoru	Zbytková vlhkost	Tlaková ztráta	Objem
Síťové	0,1 až 0,2	0,01	10
Cyklonové	1	1	1
Žaluziové	0,4	0,1	4

### Požadavky na vnější separátory páry

Snížení vlhkosti mokré páry vystupující z odlučovače na menší hodnotu než 1 %. S každým klesajícím procentem vlhkosti roste účinnost turbíny o 0,25 %.

Minimalizace tlakových ztrát. Vlivem tlakových ztrát dochází ke zhoršení tepelné účinnosti turbíny. Volba vhodného uspořádání separátorů a spojovacích potrubí s ohledem na požadavky provozu. [1]

## 4.5 Přihříváč páry

Nejčastější použití přihříváku páry je mezi vysokotlakou a nízkotlakou částí turbíny společně se separátorem. Přihřívák páry je buď napojen na ostrou páru z parogenerátoru, odběrovou páru z vysokotlaké části turbíny nebo chladiwa reaktoru. Z bezpečnostních a ekonomických důvodů se pro přihřívání nepoužívá primární voda. Uspořádání přihříváče je nejčastěji trubkové a ostrá pára zde kondenzuje. Trubkami protéká větší množství ostré páry, než stačí zkondenzovat, to zaručuje ventilaci trubek. Vnější povrch je ožebrováný. Trubky přihříváku jsou nejčastěji vyráběny z ocelí které, nejsou náchylné ke korozi např. CuNi 70/30. Teplota na SPP nesmí překročit 45°C , proto je zařízení opatřeno vnější izolací. [6]

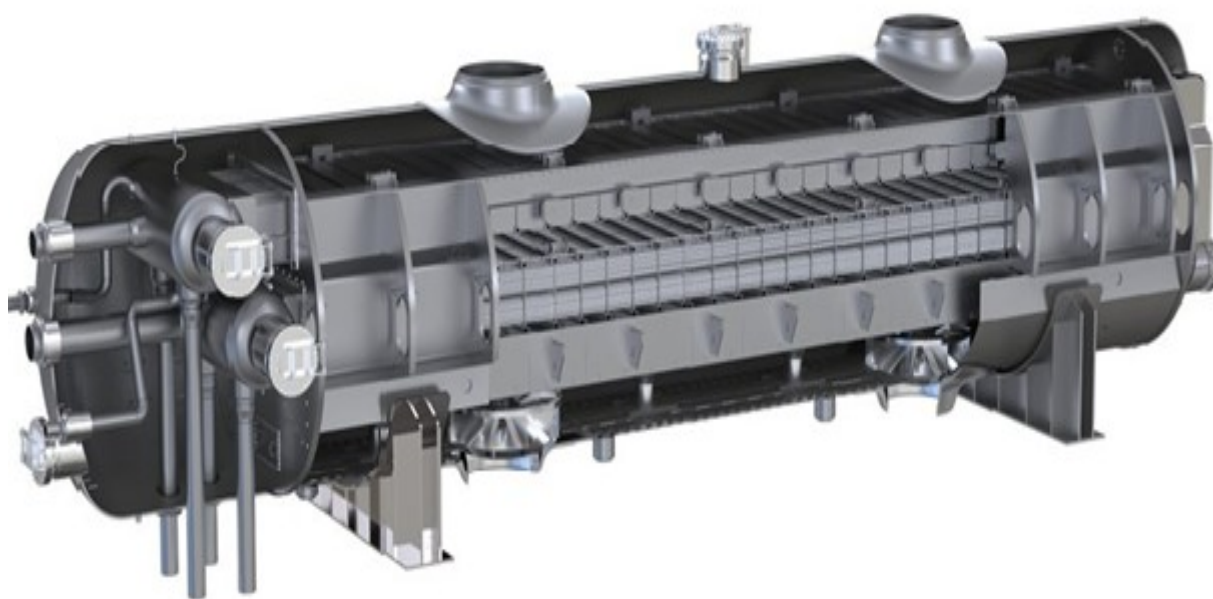
Existuje několik druhů konstrukčního provedení přihříváků páry.

- horizontální nebo vertikální provedení
- přihřívaná pára proudí z vnější nebo vnitřní strany trubek
- použití žebrovaných nebo hladkých trubek s příčnými nebo podélnými žebry
- konstrukce s trubkovnicí nebo sběračem



## 4.6 Separátor – přehříváč vlhké páry (SPP)

Ve většině jaderných elektráren pracujících na sytou páru se používají turbíny se separátory spojenými s přehřívací páry. V podstatě jde o válcovou nádobu, ve které je umístěn žaluziový nebo síťový separátor a přehříváč páry. Ve většině konstrukcí je uložení ve společném válcovém tělese. Umístění bývá, co nejbližší turbíně, aby došlo k co nejmenší tlakové ztrátě. Každá turbína má dvě taková zařízení. Zařízení jsou buď ve vertikální, nebo horizontální poloze. [1]



Obr. 12 Model SPP [13]

Vlhká pára po expanzi ve vysokotlaké části turbíny je vyvedena do systému separujících komor ve spodní části separátoru a přehříváče, kde dojde k odstranění vlhkosti páry. Vlhkost na povrchu desek je odvedena do ohříváče vody. Do horní části separátoru vstupuje pára, kde dochází k dalšímu odstranění vlhkosti a dojde k přehřívání páry. Rychlost proudící páry v separátoru je v rozmezí 10 – 15 m.s<sup>-1</sup> pro lepší účinnost zařízení. Rozměry celého zařízení jsou velice velké a velmi náročné na prostor. Jeho pořizovací cena je vysoce nákladná. Před nízkotlakou částí turbíny musí být záchytný ventil. SPP pojmají velké množství páry, které v případě náhlého odlehčení může způsobit roztočení turbíny. [6]



### **4.6.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KOMBINOVANÝCH SPP**

Konstrukční provedení odlučováků a přihříváků je takové, aby mohly být umístěny do jedné válcové nádoby.

#### **Vertikální**

Výhodou tohoto uložení je úspora místa. Ovšem velké problémy jsou např. s umístěním žaluzií. Odlučovací elementy jsou vyměnitelné, a proto je velký nárok na jejich snadnou dostupnost.

#### **Horizontální**

Snadná montáž a demontáž jednotlivých částí odlučováků. Úspora přívodního potrubí k nízkotlaké části turbíny je kratší než u vertikálních separátorů. Nevýhoda je náročnost na místo. Jedná se o dost velké zařízení o délce od 4 - 6 m.

## 5. Návrh separace pro parní generátor

### 5.1 Základní rozměry a parametry svislého parního generátoru

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr tlakové nádoby	$D_p$	4430	mm
Tlak páry	$P_p$	6,27 MPa	MPa
Teplota páry	$t_p$	278	°C
Parní výkon	G	1602	$t \cdot h^{-1}$

#### Měrná hmotnost syté páry a syté kapaliny

Pomocí počítačového výpočtového programu Chemical logic steam tab pro určování termodynamických veličin jsem při zadané teplotě získal tyto hodnoty.

#### Měrný objem syté kapaliny

$$v' = 0,001326 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Měrný objem syté páry

$$v'' = 0,031224 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

z následujících hodnot získáme měrné hmotnosti

$$\rho' = \frac{1}{v'} = \frac{1}{0,001326} = 754,03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho'' = \frac{1}{v''} = \frac{1}{0,031224} = 32,026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (1)$$

## 5.2 Návrh separace

### Požadavky na uspořádání odlučovacího pochodu v odstředivém poli

S rozvojem jaderné energetiky zvyšujeme snahu o lepší využití turbín na sytou páru. Podmínka nových řešení je dokonalá znalost všech stavů, probíhajících při separaci. Jde o teoretické úvahy odlučování kapek kapaliny z páry v odstředivém poli. V tomto odstředivém poli jde docílit zvýšení oddělovacího účinku při rozdílných měrných hmotách oddělovaných látek.

Odlučovací činnost z parovodní směsi závisí na pochodech, které probíhají v separátoru. Před vstupem mokré páry do separátoru ji lze rozdělit do tří fází.

- 1.fáze - složení mokré páry je rozhodující parametr o odloučení vlhkosti páry v separátoru. To je vytvoření kapek vody určitých velikostí a vodního filmu v proudu páry odpařováním. Tříštění, spojování kapek a tvorba vodního filmu na stěnách potrubí přivádějící páru do rotační části separátoru.
- 2.fáze - dochází k odlučování kapek vody z páry v odstředivém poli separátoru, strhávání na stěnu separátoru již vytvořeného vodního filmu a vodních kapek znovu stržených proudem vody.
- 3.fáze - jedná se o sedimentaci a unášení neodloučených nebo znovu stržených kapek vody proudem páry vystupující ze separátoru.

Každá fáze se řídí jinými zákony, zákony rozložení velikosti vodních kapek v proudu páry, které zatím nejsou dostatečně objasněny. Tím nelze určit účinnost odlučování přesně modelováním, pouze změřit na vyrobeném modelu. Ale i tím není zaručeno, že se podobná účinnost projeví na skutečném separátoru. [8]

## Hlavní podmínky pro správný průběh odlučování

- odstředivé pole vytvoříme tak, aby proudění bylo plynulé bez rázů a vírů. Složky rychlosti mokré páry (axiální, odstředivá, obvodová) v libovolných dvou sousedních bodech se mají co nejméně lišit co do velikosti a hlavně neměnit smysl v průtočném průřezu.
- složky obvodové rychlosti v odstředivém poli mají být dostatečně vysoké, aby bylo dosaženo potřebného odlučovacího účinku. Ale rychlost mokré páry v přívodním potrubí a stěně separátoru v odstředivém poli nemá překročit kritickou hodnotu, aby na místo zvýšení účinnosti odloučení nedošlo ke zvýšení únosu vlhkosti.
- je potřeba zamezit strhávání kapek již odloučené vody do výstupní trubky páry v důsledku rozdílu tlaků. Statický tlak klesá od vnějšího poloměru k ose, takže podtlak kde pára vystupuje, může způsobit nasávání kapek.
- je nutná malá tlaková ztráta odtékající odloučené vody.

### 5.2.1 Počet separačních stupňů

#### Velikost hladiny v PG

$$S_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}$$
$$S_p = \frac{\pi \cdot 4,43^2}{4} = 15,405 \text{ m}^2 \quad (2)$$

#### Parní zatížení hladiny

$$N_h = \frac{G}{\rho'' \cdot S}$$
$$N_h = \frac{1,6 \cdot 10^6}{32,026 \cdot 15,405} = 3243,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \quad (3)$$

Vzhledem na velké parní zatížení hladiny a s ohledem na požadovanou jakost páry provedeme vestavbu se dvěma aktivními stupni separace.

### 5.3 Hrubý separátor - cyklónový

Princip cyklónového separátoru spočívá k udělení rotace proudu vlhké páry lopatkami, nebo tangenciálními kanály na vstupu do odlučovače. Udělením rotace se větší kapky vylučují na válcové stěně odlučovače a vytvářejí vodní film, který je odváděn štěrbinou ven z odlučovače.

Průměr hrubého separátoru

$$D_c = 385 \text{ mm}$$

Činná výška separátoru

$$h_c = 1650 \text{ mm}$$

Za vestavbu hrubých separátorů předpokládáme maximální vlhkost  $(1 - x)_{max} = 10\%$

U hrubého separátoru se předpokládá parní výkon dle lit.[8]  $N_c = 38 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 3,8 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

**Pro odloučení daného parního výkonu bude zapotřebí**

$$n_s = \frac{G}{N_c}$$
$$n_s = \frac{1,6 \cdot 10^6}{3,8 \cdot 10^4} = 42 \text{ ks} \quad (4)$$

Uspořádání separátoru je voleno tak, aby byl splněn požadavek na potřebný počet separátorů. Počet separátoru se volí tak aby byl prostor maximálně využitý a zajištění jisté rezervy.

**Vstupní parametry** - množství syté páry jedním separátorem

$$M_p = \frac{G}{42} \cdot \frac{1}{3600}$$
$$M_p = \frac{1,6 \cdot 10^6}{42} \cdot \frac{1}{3600} = 10,58 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5)$$

Vnitřní průměr separátoru :  $D_n = 345 \text{ mm}$

## Výpočet kritické rychlosti

Maximální přípustná rychlost omezuje výkon tohoto typu separátoru, a proto je třeba řadit větší počet separátorů paralelně. Tuto podmínku jsem splnil při určení počtu hrubých separátorů s ohledem na jejich zatížení.

Kritická rychlost, je rychlost kde dochází ke smívání vodního filmu a únosu vlhkosti ze separátoru, závisí na povrchovém napětí vody, měrné hmotnosti páry a vody. Pro kritickou rychlost je udáváno několik vzorců zvolil jsem vzorec Ramzinův:

$$w_{kr} = 740 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho'' \cdot g}}$$
$$w_{kr} = 740 \cdot \sqrt{\frac{0,019}{32,026 \cdot 9,81}} = 5,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6)$$

## Povrchové napětí kapaliny

$$\sigma = 0,00714 \cdot g \cdot \left( \frac{\rho' - \rho''}{1000} \right)^4$$
$$\sigma = 0,00714 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{754,03 - 32,026}{1000} \right)^4 = 0,019 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7)$$

## Obvodová rychlost na průměru $D_N$

$$u_n = \frac{\phi \cdot M \cdot v''}{D_n^2}$$
$$u_n = \frac{1,2 \cdot 10,58 \cdot 0,031224}{0,345^2} = 3,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

Volím hodnotu rychlostního parametru  $\phi$  podle nomogramu lil.[5]. S ohledem, na pracovní tlak a snahy o splnění podmínky kritické rychlosti volím nižší parametr rychlosti.

## Tlaková ztráta separátoru

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{u_n^2}{2} \cdot \rho''$$
$$\Delta p = 12 \cdot \frac{3,33^2}{2} \cdot 32,026 = 2,13 \text{ kPa} \quad (9)$$

### Tlak páry za lopatkami separátoru

$$p_s = p_p - \Delta p_r$$

$$p_s = 7 - 0,00213 = 6,997 \text{ MPa} \quad (10)$$

### Výpočet lopatkování

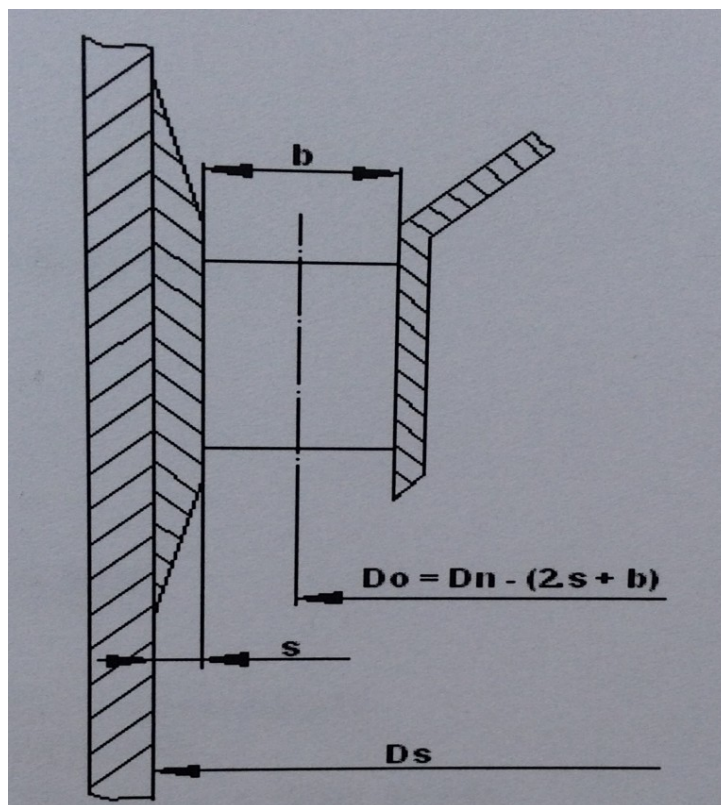
Lopatková mříž udílí vstupující směsi obvodovou rychlost  $u$ . Předpokládáme lopatky s překrytím 15 %.

$$D_o = D_n - (2 \cdot s + b)$$

$$D_o = 345 - (2 \cdot 15 + 60) = 255 \text{ mm} \quad (11)$$

b...volím dle předběžných výpočtů

s...voleno z lit [8]



Obr. 14 Schéma lopatkové mříže lit [9]

### Výpočet počtu lopatek

$$n = \frac{\pi \cdot D_o}{t}$$
$$n = \frac{\pi \cdot 0,255}{0,05} = 16,014 = 16 \text{ lopatek} \quad (12)$$

Počet lopatek se volí tak že jejich rozteč je  $t = 40 \div 50 \text{ mm}$ . lit.[8]

### Obvodová rychlost na průměru $D_o$

$$u_o \cdot D_o = D_n \cdot u_n$$

pak

$$u_o = \frac{D_n \cdot u_n}{D_o}$$
$$u_o = \frac{0,345 \cdot 3,33}{0,255} = 4,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13)$$

### Odklon proudu

$$\Delta\alpha = \gamma \cdot \frac{t}{R}$$
$$\Delta\alpha = 15,1 \cdot \frac{0,05}{0,8} = 0,943^\circ \quad (14)$$

$\alpha = 25^\circ$ ... výtokový úhel - voleno lit.[8]

$\gamma$  ...stanoveno tabulkově lit.[8]

R...poloměr zakřivení lopatek - voleno lit.[8]

### Výtoková rychlost z lopatkové mříže

$$c = \frac{u_o}{\cos(\alpha + \Delta\alpha)} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Uvažujeme 8 % -ní pokles rychlosti, takže získáme

$$c = \frac{1,08 \cdot u_o}{\cos(\alpha + \Delta\alpha)}$$
$$c = \frac{1,08 \cdot 4,51}{\cos 25,943^\circ} = 5,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (16)$$

Podmínka byla splněna. Výtoková rychlost je nižší než kritická  $w_{kr}$ .



### Rychlost páry v přívodním potrubí

(1 větev - vnitřní průměr potrubí  $D_{pp} = 0,14 \text{ m}$ )

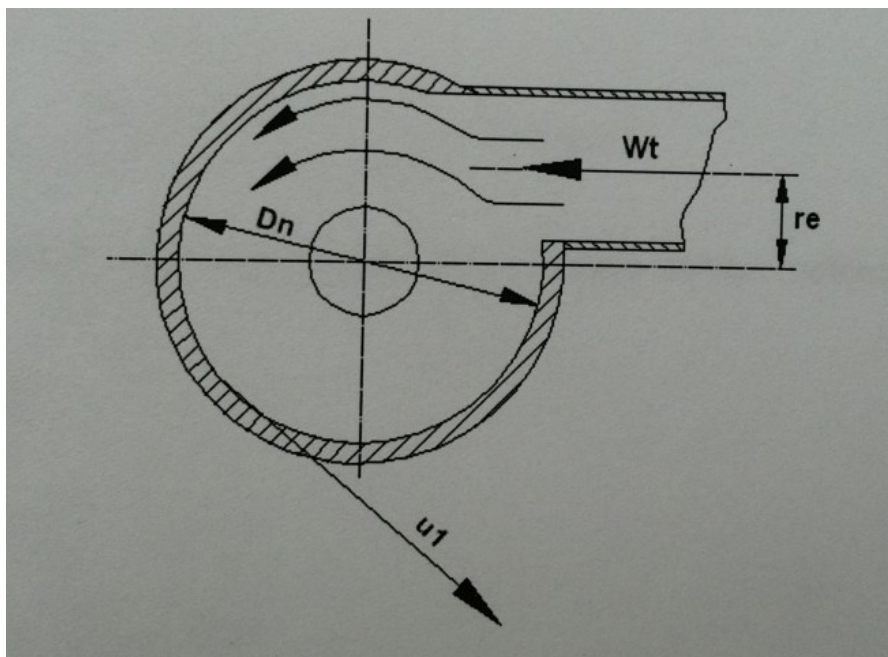
$$w_t = \frac{M_p \cdot v''}{S_s}$$
$$w_t = \frac{10,58 \cdot 0,031224}{0,0158} = 20,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (17)$$

### Světlý průřez přívodního potrubí

$$S_s = \frac{\pi \cdot D_{pp}^2}{4}$$
$$S_s = \frac{\pi \cdot 0,14^2}{4} = 0,0158 \text{ m}^2 \quad (18)$$

### Kontrakce proudu

$$r_e = 0,092 \text{ m}$$



Obr. 15 Schéma kontrakce proudu na vstupu do separátoru [9]

$$k = \frac{2 \cdot r_e}{D_n} \cdot \frac{1}{\mu}$$
$$k = \frac{2 \cdot 0,092}{0,345} \cdot \frac{1}{0,5} = 1,06 \quad (19)$$

$\mu = 0,5 \dots$  voleno z diagramu lit.[8].

### Vstupní obvodová rychlost

Počítáme se vstupní ztrátou rychlosti 5 %.

$$u_1 = 0,95 \cdot k \cdot w_t$$
$$u_1 = 0,95 \cdot 1,06 \cdot 20,91 = 21,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (20)$$

### Obvodová rychlost před lopatkovou mříží

$$u_2 = \frac{u_1}{\frac{D_o}{D_n} + 0,16 \cdot k \cdot \frac{w_t \cdot D_n^2}{M \cdot v''}}$$
$$u_2 = \frac{21,07}{\frac{0,255}{0,345} + 0,16 \cdot 1,06 \cdot \frac{20,91 \cdot 0,345^2}{10,58 \cdot 0,031224}} = 10,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (21)$$

### Relativní rychlost na vstupu do lopatkování

$$w_2 = \frac{M_p \cdot v''}{(\pi \cdot D_o - n \cdot h) \cdot b}$$
$$w_2 = \frac{10,58 \cdot 0,031224}{(\pi \cdot 0,255 - 16 \cdot 0,002) \cdot 0,06} = 7,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (22)$$

h ...průmět čelní hrany lopatky do podélného směru

### Nátokový úhel

$$\beta = \arctg \frac{w_2}{u_2}$$
$$\beta = \arctg \frac{7,06}{10,45} = 34,2^\circ \quad (23)$$

Podmínka překrytí větší než 15 % je splněna.

### Délka separátoru

Určíme z časové konstanty separátoru T, kterou v závislosti na tlaku odečteme z grafu lit.[8]. T = 5,1 s

$$l = \frac{T \cdot M \cdot v'}{\frac{\pi \cdot D_n^2}{4}}$$
$$l = \frac{5,1 \cdot 10,58 \cdot 0,001326}{\frac{\pi \cdot 0,345^2}{4}} = 0,765 \text{ m} \quad (24)$$

## 5.4 Návrhy dalších variant hrubé separace

### První varianta separátoru

Předpokládalo se, že nad rozváděcími lopatkami se vytvoří hladina, která se v horní části opře o límec vnitřního pláště. Potom, voda bude odtékat přes mříž válcových lopatek do odvodňovacích kanálků. Zbylá plynná složka bude postupovat přes plášť z děrovaného plechu separátoru. Provoz separátoru je ověřován při různých šířkách výstupní štěrby pro vodu. V provozu docházelo k silnému výtoku zpěněné vody kanálkami. Dále bylo zjištěno, že štěrbina mezi lopatkami seškrcuje průřez pro odvod vody. Tím dochází ke zbytečnému zdržení vody v separačním prostoru a voda je pak snadno strhávána proudem ven ze separátoru. Tento typ separátoru pracoval při poměrech odpovídajících jmenovitému zatížení. Do kanálku bylo strháváno velké množství vzduchu, což způsobuje, že hladina v okolí separátoru byla velmi rozbouraná.

### Druhá varianta separátoru

Toto řešení separátoru se snaží odstranit problémy vyskytující se v první variantě. Pro zlepšení činnosti bylo instalováno horní záchytné hrdlo. Výstup vody byl opatřen sifonovým uzávěrem, aby se zabránilo průniku plynné složky do hladiny. V horní části výstupního záchytného kužele byly umístěny 4 výstupní štěrby pro zlepšení efektu odloučení. Měřením se zjistilo, že se mnohem zlepšila činnost na straně odvádění odloučené vody. Důležitým konstrukčním požadavkem na uspořádání separátoru je rychlý odvod vody. Avšak horní záchytné hrdlo neplnilo dobře svou funkci a pouze zvyšovalo tlakovou ztrátu.

### Třetí varianta separátoru

U této varianty se blížíme k prvnímu typu separátoru, na kterém došlo k úpravám ve snaze zlepšit účinnost separátoru na straně odvádějící páru. Do separačního prostoru byla umístěna záchytná žaluzie, která plnila funkci zachytávání unášených kapiček vody v plynné složce. Žaluzie navíc podporovaly rotaci kapiček a tím docházelo k dodatečnému odloučení nástríkem vlhkosti na stěnu separátoru, odkud byla odváděna. Tato činnost byla prověřována bez výstupního sifonu. Separátor odváděl všechnu odloučenou vodu, avšak hladina byla silně rozbouraná. Instalací sifonu se potvrdila měření u druhé varianty. Hladina vody přestala být rozbouraná a již nerotovala. Vzduch pronikající do hladiny byl minimální. Žaluzie dobře zachycovali vodu, což zlepšilo účinnost a použitelnost separátoru.

### **Čtvrtá varianta separátoru**

U této konstrukce došlo k výrazné přestavbě koncepce separátoru. Ve spodní části separátoru byl upraven sifonový uzávěr na větší průměr, který je doplněn lopatkami rušících rotací vody ve výstupu. Nad výstupním hrdlem byl vytvořen separační prostor se záchytným kuželem. Kužel zachytává vodu a odvádí ji do soustavy čtyř trubek do sběrného prostoru a odtud je voda odváděna odtokovou stříškou ven ze separátoru. Nad kuželem je provedena ještě odstříkovací stříška s výstupním hrdlem pro odvod páry. Odloučená voda byla ve třetí variantě usměrňovaná lopatkami na stěně vnějšího válce a po ní odváděna ze separátoru. Pro toto řešení však byla odstraněna a tím došlo ke snížení separátoru. Ověřovací měření ukázalo, že takto upravený separátor na zkušební trati měl velmi dobré zlepšení účinnosti vlastního odlučovače. Hladina v separátoru byla klidná a nedocházelo k velkým přestřikům.

### **Pátá varianta separátoru**

Parovodní směs vstupuje do přiváděcího potrubí a radiálními lopatkami je uvedena do rotace. Odstředivá síla působí na kapky vody, které narážejí na vnější plášť a stékají odváděcími kanálky do spodní části separátoru, kde jsou odváděny ven. Čistá pára vystupuje horní částí separátoru. Zbývá voda je odváděna v horní části separátoru víkem s odváděcími kanálky. Ve středu separátoru je umístěna trubka, která eliminuje podtlak vznikající v ose, jenž má vliv na proudění odloučené páry hrdlem. Tím je zabráněno, aby pára nebyla strhávána zpět do odloučené vody. Při měření bylo zjištěno, že odvod odloučené vody má velmi velkou tlakovou ztrátu a dráhy kapek jsou delší. Tímto došlo ke snížení účinnosti.

### **Šestá varianta separátoru**

Tato konstrukce separátoru se snaží zlepšit nedostatky, které byly zjištěny u varianty 5. Úpravy separátoru spočívaly v tom, že došlo k prodloužení lopatek vířivého ústrojí. Další úpravou jsme prodloužili přídavný plášť vířivého ústrojí a jeho povrch byl opatřen spirálními žebry, které zajišťují jeho stálou rotaci.

Vývoj cyklónových separátoru je velmi nákladnou a složitou záležitostí. S rozvojem jaderné energetiky se zvýšila snaha o neoptimálnější řešení. V experimentálním řešení se bude dále rozvíjet chování parovodní směsi v separačním prostoru. Tvorba kapek a její oddělování není dostatečně teoreticky známa a prakticky prokázána. K vyřešení tohoto problému je třeba věnovat hodně úsilí. Podmínkou řešení je dokonalá znalost všech dějů při separaci. Materiály pro navržení jednotlivých variant separace byly použity z Výzkumného ústavu Brno.

## 5.5 Jemný separátor - žaluziový

Žaluziový separátor je soustava vertikálně orientovaných plechů, s určitým sklonem, které tvoří kruhové oblouky, nebo šípkové štěrby. Mokrý pára proudí přes zakřivené kanálky a mění směr. Tímto dochází k odlučování vody na plechových stěnách. Voda vytváří film, který stéká po žaluziích svisle dolů. Účinnost žaluziových separátorů je nezávislá na průtoku páry, nezávisí téměř na obsahu vlhkosti páry, ani na disperzi vodních kapek, je určena pouze její konstrukcí. Existuje, ale určitá kritická rychlost průtoku páry, při níž dochází k trhání vodního filmu na žaluziové trati a vlhkost se vrací zpět do páry. Pracovní rychlost v žaluziovém separátoru se doporučuje 1/5 až 3/4 kritické rychlosti, ačkoliv nejlepší separační účinek je v blízkosti kritické rychlosti. Kritická rychlost vychází s Kutateladzeho kritéria.

$$Ku = \frac{w_{kr} \cdot \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}} \quad (25)$$

kde je  $Ku$  pro vertikální žaluzie

$$Ku = K - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{b}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (26)$$

### Kritická rychlost

$$Ku = \frac{w_{kr} \cdot \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}} \rightarrow w_{kr} = \frac{Ku \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}} \quad (27)$$

Maximální vlhkost za vestavbou žaluziových separátorů předpokládáme  $(1-x)_{\text{zal}} \leq 0,4\%$ . Žaluziové separátory použijeme s již osvědčenými žaluziemi v jaderné energetice.

Činná výška žaluzií  $h_z = 1200 \text{ mm}$ .

### Povrchové napětí

Určíme pomocí Bačinského vztahu

$$\sigma = c_\sigma \cdot (\rho' - \rho'')^4$$

Pro vodu je  $c_\sigma = 0,07 \cdot 10^{-12} \text{ N} \cdot \text{m}^{11} \cdot \text{kg}^{-4}$

$$\sigma = 0,07 \cdot 10^{-12} \cdot (754,06 - 32,02)^4 = 0,019 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (28)$$

### 5.5.1 Návrh jemného odlučovače I. varianta

Výška	$h = 1,2 \text{ m}$
Rozteč	$t = 0,01 \text{ m}$
Rozvinutá šířka žaluzií	$b = 0,26 \text{ m}$
Polovina úhlu zakřivení	$\alpha = 48^\circ$
Vstupní vlhkost	$(1 - x) = 10\% \text{ z toho plyne } x = 90\%$
Parametr maximálního zatížení	$K = 2,2 \div 2,5$

Dosazením do vztahu pro kritickou rychlost získáme hodnotu  $K_u$ . Tím dostaneme hodnotu kritické rychlosti v žaluziích  $w_{kr}$ .

$$K_u = K - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{b}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$
$$K_u = 2,5 - 1,69 \cdot \left(\frac{1-0,9}{0,9}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 0,01}{0,26}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48^\circ} = 2,164 \quad (29)$$

$$w_{kr} = \frac{K_u \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}}$$
$$w_{kr} = \frac{2,164 \cdot \sqrt[4]{9,81 \cdot 0,019 \cdot (754,03 - 32,026)}}{\sqrt{32,026}} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (30)$$

#### Rychlost páry na vstupu do žaluziového separátoru

$$w_{vs} = \frac{G''}{S_{\text{žal}} \cdot \rho''}$$
$$w_{vs} = \frac{888,88}{31,72 \cdot 32,026} = 0,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (31)$$

Aby nedocházelo ke strhávání vodního filmu proudící párou zpět do odlučovače, musí být dodržena podmínka rychlosti, která má ležet v rozmezí:

$$w_{dop} = (0,2 \div 0,7) \cdot w_{kr} = (0,2 \div 0,7) \cdot 1,26 = 0,25 \div 0,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (32)$$

Z vypočtených hodnot vidíme, že podmínka rychlosti v žaluziích  $w_{vs}$  leží v rozmezí doporučených hodnot.

### Průtočná plocha separátoru

$$S_{zs} = \frac{\dot{M}_p \cdot v''}{w_{vs}}$$
$$S_{zs} = \frac{888,88 \cdot 0,031224}{0,87} = 31,9 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Průtočná plocha separátoru je poměrně velká, bude odlučování probíhat ve dvou stupních.

### Šířka 1. stupně separátoru

S ohledem na velikost parního prostoru volím šířku žaluziové kazety  $e_1 = 1,1 \text{ m}$ .

$$S_{zl} = e_1 \cdot 2 \cdot h \cdot n$$
$$S_{zl} = 1,1 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 8 = 21,1 \text{ m}^2 \quad (34)$$

### Průtočná plocha 2. stupně

$$S_{zs2} = S_{zs} - S_{zs1}$$
$$S_{zs2} = 31,9 - 21,1 = 10,8 \text{ m}^2 \quad (35)$$

### Šířka 2. stupně separátoru

$$e_2 = \frac{S_{zs2}}{2 \cdot h} \cdot \frac{1}{n}$$
$$e_2 = \frac{10,8}{2 \cdot 1,2} \cdot \frac{1}{8} = 0,562 \rightarrow 0,6 \text{ m} \quad (36)$$

### Hydraulický výpočet žaluziového separátoru

Koeficient odporu žaluzie  $\xi_z = 9,78$  viz lit. [8].

Hustota vstupující mokré páry o  $x = 0,9$  je  $\rho = 35,72 \text{ kg/m}^3$

$$\Delta p_z = \xi_z \cdot \rho \cdot \frac{w_{vs}^2}{2}$$
$$\Delta p_z = 9,78 \cdot 35,72 \cdot \frac{0,87^2}{2} = 132,21 \text{ Pa} \quad (37)$$

## Tlak páry za žaluziemi

$$p_z = p_p - \Delta p_z$$
$$p_z = 7 - 0,00013221 = 6,999 \text{ MPa} \quad (38)$$

Tlaková ztráta je minimální, proto lze považovat tlak za separátorem za nezměněný.

### 5.5.2 Návrh jemného odlučovače II

Výška	$h = 1,2 \text{ m}$
Rozteč	$t = 0,01 \text{ m}$
Rozvinutá šířka žaluzií	$b = 0,26 \text{ m}$
Polovina úhlu zakřivení	$\alpha = 48^\circ$
Vstupní vlhkost	$(1 - x) = 10\%$ z toho plyne $x = 90\%$
Parametr maximálního zatížení	$K = 2,2 \div 2,5$

#### Předpokládaná maximální vlhkost páry na výstupu ze separátoru

$$(1 - x_c)_{max} = 0,4\%$$
$$x_c = 0,996 \quad (39)$$

#### Kutateladzeho kritérium

$$Ku = K - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{b}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$
$$Ku = 2,5 - 1,69 \cdot \left(\frac{1-0,9}{0,9}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 0,01}{0,26}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48^\circ} = 2,164 \quad (40)$$

#### Kritická rychlost v žaluziích

$$w_{kr} = \frac{Ku \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}}$$
$$w_{kr} = \frac{2,164 \cdot \sqrt[4]{9,81 \cdot 0,019 \cdot (754,03 - 32,026)}}{\sqrt{32,026}} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (41)$$



### Skutečná rychlost v žaluziích

$$w_{vs} = \frac{G''}{S_{\text{žal}} \cdot \rho''}$$
$$w_{vs} = \frac{888,88}{31,72 \cdot 32,026} = 0,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (42)$$

### Průtočná plocha separátoru

$$S_{zs} = \frac{\dot{M}_p \cdot v''}{w_{vs}}$$
$$S_{zs} = \frac{888,88 \cdot 0,031224}{0,87} = 31,9 \text{ m}^2 \quad (43)$$

### Šířka 1. stupně separátoru

S ohledem na velikost parního prostoru volím šířku žaluziové kazety  $e_1 = 2,2 \text{ m}$ .

$$S_{zl} = e_1 \cdot 2 \cdot h \cdot n$$
$$S_{zl} = 2,2 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 4 = 21,12 \text{ m}^2 \quad (44)$$

### Průtočná plocha 2. stupně

$$S_{zs2} = S_{zs} - S_{zs1}$$
$$S_{zs2} = 31,9 - 21,12 = 10,78 \text{ m}^2 \quad (45)$$

### Šířka 2. stupně separátoru

$$e_2 = \frac{S_{zs2}}{2 \cdot h} \cdot \frac{1}{n}$$
$$e_2 = \frac{10,78}{2 \cdot 1,2} \cdot \frac{1}{4} = 1,082 \rightarrow 1,1 \text{ m} \quad (46)$$

## Hydraulický výpočet žaluziového separátoru

Koeficient odporu žaluzie  $\xi_z = 4,6$  viz lit. [8]

Hustota vstupující mokré páry o  $x = 0,9$  je  $\rho = 35,72 \text{ kg/m}^3$

$$\Delta p_z = \xi_z \cdot \rho \cdot \frac{w_{vs}^2}{2}$$
$$\Delta p_z = 4,6 \cdot 35,72 \cdot \frac{0,87^2}{2} = 62,183 \text{ Pa} \quad (47)$$

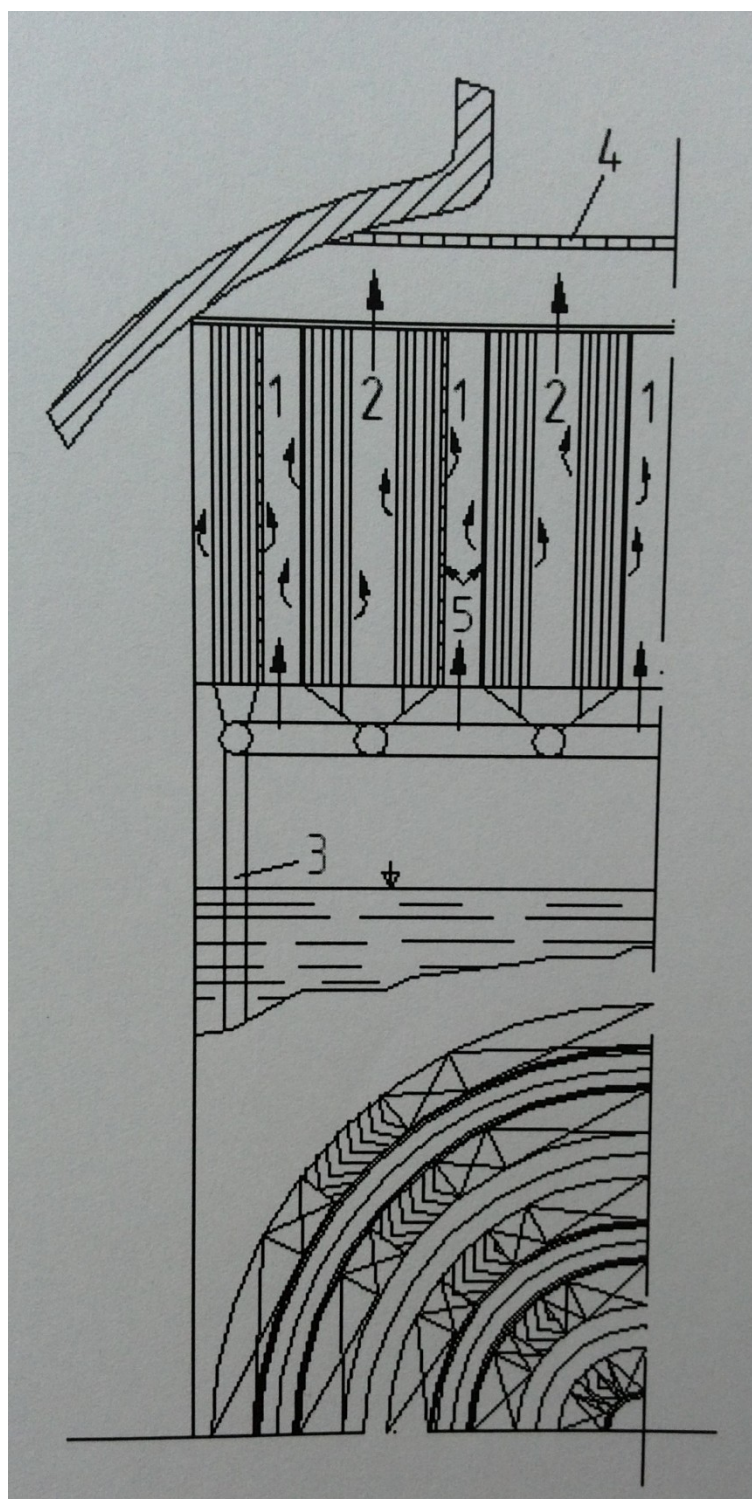
### Tlak páry za žaluziemi

$$p_z = p_p - \Delta p_z$$
$$p_z = 7 - 0,000062183 = 6,999 \text{ MPa} \quad (48)$$

Tlaková ztráta žaluziového separátoru je minimální v porovnání s tlakovou ztrátou cyklonového separátoru. Proto uvažujeme, že tlak na výstupu zůstane stejný.

## 5.6 Návrh dalších variant jemné separace

U žaluziových separátorů je potřeba zajistit, aby maximální rychlost v separátoru byla dodržena v celém průřezu a nedocházelo k nerovnoměrnosti průtoku. Zařazením děrovaných plechů dojde k menšímu nárůstu tlakové ztráty systému a vyrovnaní průtoku. Doplnujícím prvkem separátorů všech typů bývají děrované stropní šíty. Stropní štít má otvory 6 až 10 mm a součinitel tlakové ztráty  $\xi = 1,5$ . Štít svým odporem vyrovnává zatížení rychlosti v celém parním objemu. Kromě škrcení v otvorech, může dojít ještě k odloučení části zbytkové vlhkosti.



Obr. 16 Schéma žaluziové vestavby lit [8]

1 - vstup páry do žaluzií, 2 - výstup páry ze žaluzií, 3 - odvod odloučené vody,  
4 - děrovaný stropní štít, 5 - děrovaný plech

## 6. Závěr

V této práci bylo mým úkolem popis a analýza jednotlivých druhů separátorů pro parní generátory, jakožto základního prvku primárního okruhu jaderné elektrárny III. Generace s tlakovodním reaktorem VVER.

První část bakalářské práce je věnována jednotlivým zařízením jaderné elektrárny a všeobecným poznatkům a principům jaderné elektrárny. Je zde popsán princip separace a problematika vlhké páry a její dopady na zařízení jaderné elektrárny. Dále jednotlivé principy a druhy odlučovačů a jejich vliv na vlhkost páry a několik zásad a požadavků získané z odborné literatury, které by měli být splněny pro dosažení co nejlepší efektivity tohoto způsobu, založeném na fyzikálním principu.

Následně je zde vyřešena dvoustupňová separace, která je složena z hrubé části tvořené cyklónovými separátory a jemné části složené ze žaluziového separátoru. V první fázi výpočtu jsem stanovil počet separátoru a následně kritickou rychlost v cyklónovém separátoru, kde nesmí dojít k jejímu překročení, tato podmínka byla splněna. Dále je zde řešen druhý stupeň separace v žaluziovém separátoru. V poslední části, jsou výpočty doplněny o několik variant možných řešení na základě výzkumu, které byly uskutečněny a zhodnocují možné koncepce řešení separace. Pro návrh separátoru páry v parním generátoru bych na základě provedeného výpočtu zvolil konstrukční variantu číslo 6 s prodlouženými lopatkami zaručující optimální odlučování kapiček vody a dobrou kvalitu páry pro turbínu na sytou páru.

V této bakalářské práci jsem se snažil o získání co nejlepší představy této problematiky. Práci tvoří popsání jednotlivých druhů separace a jejich zhodnocení pro další řešení. Vývoj separátoru je velmi nákladnou a složitou záležitostí a chování páry v separátoru není dostatečně popsáno ani prakticky dokázané a je třeba této problematice věnovat hodně úsilí.

## Seznam použité literatury:

- [1] HEJZLAR, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren 1. díl, skripta ČVUT*  
Praha, 1989, ISBN 80-01-00164-4
- [2] KOLAT, P.: *Úvod do jaderné energetiky*, elektronická skripta VŠB-TU Ostrava,  
2011, 178 s.
- [3] Mátal, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERNVUT v Brně.  
2001. ISBN 80-214-2028-6.
- [4] JANEČEK, J.: *Separátor a přehříváč v jaderné elektrárně*, bakalářská práce,  
Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava, 2010
- [5] Hezoučský F.: *Základy teorie provozních režimu jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze. ass 2005. ISBN80-01-03324-4
- [6] HEGEROVÁ, V.: *Návrh separátoru a přehříváče páry pro jadernou elektrárnu MIR1200*:  
diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2013
- [7] RICHTER, A. *Separátor a přehříváč jaderné elektrárny MIR 1200* : bakalářská práce.  
Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011
- [8] ČERNÝ, V.: *Základy Konstruování kotlů a parogenerátorů jaderných elektráren*,  
ČVUT Praha 1983
- [9] ŠLAHAŘ, R.: *Návrh separátoru pro svislý parní generátor nové koncepce jaderné elektrárny VVER 1000*: diplomová práce Ostrava VŠB - Tecchnická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2005
- [10] CENELIN, Czech Nuclear Education network, [online], 2014 , [vid 2014-02-27]. Dostupné z :  
[http://poli.feld.cvut.cz/cenelin/sites/default/files/styles/large/public/field/image/PG\\_IV.png](http://poli.feld.cvut.cz/cenelin/sites/default/files/styles/large/public/field/image/PG_IV.png)
- [11] ALSTON, Arabelle™ steam turbines, [online], [vid 2014-02-17] .Dostupné z :  
<http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Images/Gallery/nuclear-turbine-hp-ip-close-up-cgi.jpg?h=&w=&maxheight=&maxwidth=&scale=upscalecanvas>

- [12] EC Most, Chladicí věže, [online], 2014 [2014-01-20]. Dostupné z :  
[http://www.ecmost.cz/clanky.php?page=chladici\\_veze](http://www.ecmost.cz/clanky.php?page=chladici_veze)
- [13] 2013Schéma JE Temelín, [online], 2014 , [vid 2014-02-12]. Dostupné z :  
<http://www.fi.muni.cz/~tomp/envi/esaje/polacek/temelin.html>
- [14] POWER CORROSION, *Turbine blade cracking*, [online], [vid 2014-01-05 ], Dostupné z :  
<http://www.powerccl.co.uk/turbine-corrosion.html>

## **Seznam příloh**

Varianty separátorů

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za poskytnuté materiály a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.